

废机油再生剂对温拌再生沥青混合料性能影响研究

王志杰^{1,2}, 付其林¹, 黄亮³, 魏建国¹, 王力扬¹ 编译

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 佛山市公路桥梁工程监测站有限公司;
3. 山西路桥第二工程有限公司)

摘要:为探究废机油(UMEO)再生剂对温拌再生沥青混合料(RAP-WMA)性能影响,通过 AASHTO T195 试验、马歇尔试验、60℃单轴压缩试验、冻融劈裂试验研究不同 UMEO 再生剂和 RAP 掺量对温拌再生沥青混合料性能影响,同时设置普通热拌和温拌沥青混合料作为对照组试验。结果表明:掺入 UMEO 再生剂可显著改善温拌再生沥青混合料拌和均匀性、压实特性、高温性能、力学性能、水稳定性等特性,且随着 RAP 掺量提高,其对部分性能改善效果更明显;掺入 UMEO 可将 RAP 掺量从 20% 提高至 60%;基于显著性分析结果可知:UMEO 掺量对抗压强度影响最显著,对相对空隙率影响显著性最小;综合考虑沥青混合料各项性能,优选出各 RAP 掺量下的最佳再生剂掺量范围:20% RAP-0~10% UMEO、30% RAP-10%~12.5% UMEO、40% RAP-12.5%~17.5% UMEO、50% RAP-15%~17.5% UMEO、60% RAP-17.5%~20% UMEO。

关键词:道路工程;废机油再生剂;温拌再生沥青混合料;RAP;性能试验

随着废旧沥青混合料数量逐年增大,其所引发的环境问题及能源浪费逐渐引起人们的重视,为此,道路工作者们对废旧沥青混合料的再利用相继展开研究,并率先对热再生技术进行探究。随着热再生技术日渐成熟并大范围应用推广,其种种弊端也逐渐显露,人们转而开始探究温再生技术,发现温再生技术可在较低温度下进行沥青混合料的生产施工,避免了因高温而引发的高能源消耗、废气排放、沥青老化等问题,且其对沥青黏度要求较低,对提高 RAP 掺量有所帮助,同时 Mallick 等研究发现,掺加合适的温拌剂可以使温拌再生沥青混合料性能与热拌再生沥青混合料相近。

然而,目前废弃沥青混合料的再利用率尚不足 30%,有人将 RAP 应用于沥青混凝土和密集配沥青碎石(DBM)中,发现混合料中最多可掺 20% RAP,可见再生技术中 RAP 掺量尚待提高。掺入再生剂是提高 RAP 掺量的有效途径之一;Nahar 等研究表明:再生剂可将旧料中硬质老化沥青软化,使新旧沥青混溶充分。废机油(UMEO)成分与沥青较为接近,且其黏度较老化沥青更低,可恢复其部分活性,是一种较为理想的再生剂,探究 UMEO 再生剂应用于再生沥青混合料的可行性已成为当前研究重点;中国国内研究中,谢海群等对 UMEO 再生工艺进行研究,发现所提炼

UMEO 性能可满足相关道路沥青标准;肖庆一等研究表明:UMEO 再生剂可恢复 RAP 中老化沥青黏弹性和高温性能,但对其水敏感性不利,同时可改善旧料含量热拌再生沥青混合料低温抗裂性能。国外未见 UMEO 再生剂相关报道,且现有研究中也鲜有人探究 UMEO 再生剂对温拌再生沥青混合料性能的影响。该文采用室内性能试验,研究不同 UMEO 再生剂和 RAP 掺量对温拌再生沥青混合料性能的影响,并基于试验结果进行显著性分析及再生剂掺量优选,为其在温再生技术中的应用提供理论依据。

1 原材料与级配

1.1 原材料

(1) RAP

该文 RAP 取自印度公路 Srinagar-Qazigund。根据国际标准协会 ISO 对工业润滑油的黏度分类标准,通过抽提获得的旧沥青对应黏度等级为 VG-10。

(2) 再生剂与温拌剂

该文选用 UMEO 和 EvothermTM 作为再生剂和温拌剂。EvothermTM 是 Mead Westvaco 在 2003 年发明的新一代温拌剂,它可以使沥青混合料的拌和温

度比传统的热拌沥青混合料低 50~75 ℃,同时能够保证温度降低后混合料的路用性能。UMEO 与 Evo-thermTM 性能指标见表 1。

表 1 UMEO 和 EvothermTM 相对密度及运动黏度

测试指标	相对密度	运动黏度(40 ℃)/cst
UMEO	0.878	415
Evotherm TM	0.999	740

(3) 沥青

该文新沥青采用 90[#] 基质沥青,其性能指标见表 2。

1.2 级配

(1) 集料级配

参照 MORTH 中关于 DBM—Ⅱ 集料级配相关规定,进行该文集料级配设计,不同 RAP 掺量的集料级配(各类集料占总集料比例)见表 3。

表 2 90[#] 基质沥青性能指标(黏度等级 VG—10)

检测指标	单位	检测结果	技术要求	试验方法
针入度(25 ℃,100 g,5 s)	0.1 mm	83	80~100	ISO:1203
软化点(R&B)	℃	49	≥40	ISO:1205
闪点	℃	265	≥220	ISO:1448[P: 69]
相对密度		1.02	0.97~1.02	ISO:1202
TFOT 残留延度(25 ℃,50 mm/mm)	cm	>100	≥75	ISO:1208

表 3 不同 RAP 掺量的集料级配

RAP 掺量/%	各类集料占总集料比例/%						合计
	40 mm 粗集料	20 mm 粗集料	10 mm 粗集料	细集料 和砂	4.75 mm 以下粒径机 制砂和石粉	填料 (水泥)	
0	10	29	26	22	10	3	100
20	10	22	20	22	3	3	100
30	10	22	15	17	3	3	100
40	10	22	10	15	0	3	100
50	10	17	10	10	0	3	100
60	10	17	5	5	0	3	100

(2) 沥青混合料级配

该文参照 DBM—Ⅱ 级配及采用马歇尔设计方法,

对不同 RAP 掺量的沥青混合料进行配合比设计,见表 4。

表 4 不同 RAP 掺量的沥青混合料级配

RAP 掺量/%	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
	37.5	26.5	19	13.2	4.75	2.36	0.3	0.075
0	100	95	84	68	41	37	11	5
20	100	95	85	71	44	37	11	5
30	100	95	85	71	43	36	11	5
40	100	95	85	70	43	34	11	5
50	100	95	86	73	43	34	11	5
60	100	95	86	72	43	32	12	5
DBM—Ⅱ	100	90~100	71~95	56~80	38~54	28~42	21~7	2~8

通过马歇尔试验方法,测得不掺 RAP 的沥青混合料最佳油石比为 4.66%,20%~60% RAP—WMA

最佳油石比则分别降低至 3.73%、3.26%、2.80%、2.33%、和 1.86%。

2 试验设计与结果分析

2.1 试验设计

室内性能试验主要针对普通热拌和温拌沥青混合料(HMA、WMA)、不同 UMEO 再生剂和 RAP 掺量的 RAP-WMA 进行,其中 RAP 掺量分别选取 RAP-WMA 总质量的 20%、30%、40%、50% 和 60%。基于 Zaumanis 等研究可知:采用 Superpave 设计法测得热再生最大和最小 UMEO 再生剂掺量分别为 16% 和 25%,因为该文为温再生技术研究,拌和温度降低,故最小 UMEO 掺量调至 10%,最大 UMEO 掺量调至 20%,UME0 掺量分别选取最佳沥青用量的 10%、12.5%、15%、17.5% 和 20%。为后文便于叙述,将不同掺量下混合料进行编号。HMA、WMA、20% RAP-WMA、30% RAP-WMA、40% RAP-WMA、50% RAP-WMA、60% RAP-WMA。编号分别为 A、B、C、D、E、F、G。

(1) AASHTO T195 试验

该文采用美国 AASHTO T195 试验对沥青混合料拌和均匀性进行评价,具体试验参数为:于 120℃ 时拌和沥青混合料,拌和均匀后过 9.5 mm 筛孔筛分出 500 g 粗颗粒,清点颗粒数量,并检查其表面裹覆程度,若颗粒表面有细微未裹覆斑点视为“部分裹覆”,无斑点则为“完全裹覆”,二者之比即为颗粒裹覆率,美国 AASHTO 标准规定 9.5 mm 及以上粒径颗粒裹覆率达到 95% 及以上时视为拌和均匀。

(2) 马歇尔试验

马歇尔试验分为两部分进行,参照 AASHTO T245 试验方法测定试件相对空隙率,具体试验参数为:成型不同 UMEO 和 RAP 掺量的温拌试件,同时成型同种掺量的热拌试件,前者与后者空隙率之比即为相对空隙率;参照 ASTM D6927 试验方法进行马歇尔稳定度试验,测定试件残留稳定度和马歇尔模数。规范中对 DBM 空隙率、相对空隙率和马歇尔模数的要求范围分别为 3%~5%、0.9~1.1、2~5 kN/mm,其残留稳定度应不小于 80%。

(3) 60℃ 单轴压缩试验

单轴压缩试验参照 ASTM D1074-09 试验方法,具体试验参数为:将标准马歇尔试件于 60℃ 烘箱 24 h,而后于室温冷却 2 h,并于 25℃ 养生 4 h。试验过程中 UTM 机施加应力为 20.7 MPa,加载速率为 5.08 mm/min,于 90℃ 试验温度下加载 2 min,测定

试件 60℃ 抗压强度。

(4) 冻融劈裂试验

参照 AASHTO T283 试验方法进行冻融劈裂试验,将未冻融与冻融后标准马歇尔试件于试验机上以 50 mm/min 的加载速率加载,测定并计算其冻融劈裂强度比 TSR,规范规定 TSR 最低限值为 80%。

2.2 结果分析

2.2.1 拌和均匀性

以 9.5 mm 以上粒径颗粒裹覆率作为沥青混合料拌和均匀性评价指标,AASHTO T195 试验结果如图 1、2 所示。

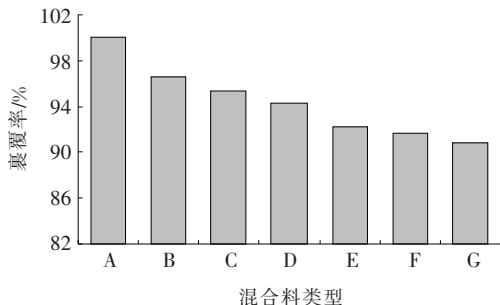


图 1 无再生剂试件颗粒裹覆率

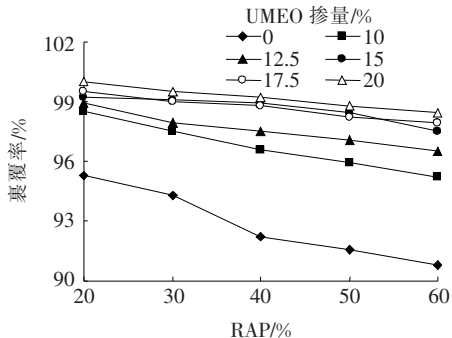


图 2 掺入 UMEO 再生剂试件颗粒裹覆率

由图 1、2 可知:

(1) 提高 RAP 掺量会降低沥青混合料颗粒裹覆率。图 1 中 HMA 颗粒裹覆率达到了 100%,相比之下,WMA 颗粒裹覆率仅为 96.6%,可见由传统热拌技术成型的沥青混合料试件拌和十分均匀,温拌技术稍差,不过仍满足要求,且当 RAP 掺量增加至 20% 时,RAP-WMA 颗粒裹覆率为 94.3% 低于 95%;继续掺入 RAP,RAP-WMA 颗粒裹覆率持续下降,60% RAP-WMA 颗粒裹覆率仅为 91.8%,较初始的 WMA 颗粒裹覆率降低了 6%,这是由于老化沥青含量过高导致沥青与集料间黏附性不足,在拌和过程中沥青较易从集料表面脱落,“部分裹覆”颗粒数量增多,

从而造成混合料颗粒裹覆率降低、拌和不充分。

(2) 掺入 UMEO 再生剂可显著提高沥青混合料颗粒裹覆率,且随着 RAP 掺量增加,其效果越显著。图 2 中,对于 20% RAP—WMA,当 UMEO 掺量由 0% 增加至 20% 时,RAP—WMA 颗粒裹覆率由 95.3% 增大至 100%,增幅为 4.7%;继续提高 RAP 掺量至 60%,其增幅达到 7.7%。由此可见,UMEO 再生剂可有效软化 RAP 中老化沥青,增大沥青与集料间黏结作用,从而提高沥青混合料拌和均匀性,且对于较低掺量的 RAP—WMA,掺入足够的 UMEO 再生剂可令其拌和效果与热拌混合料相当。

2.2.2 压实特性

沥青混合料空隙率可以较好反映混合料压实后的密实程度,空隙率计算结果如图 3、4 所示。

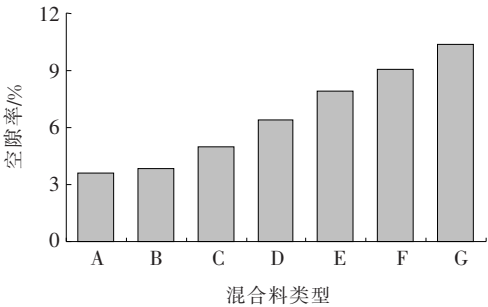


图 3 无再生剂试件空隙率

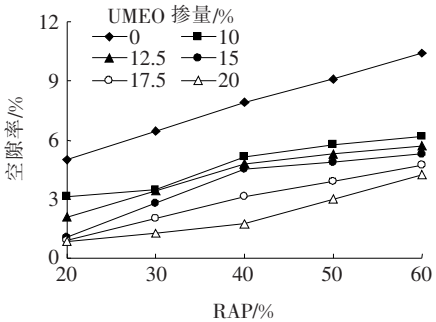


图 4 掺入 UMEO 再生剂试件空隙率

由图 3、4 可知:

(1) 沥青混合料空隙率随着 RAP 掺量增加而快速增大。图 3 中 WMA 空隙率与 HMA 基本相同,掺入 20% RAP 后的空隙率增大至 4.99%,几乎达到 DBM 空隙率上限;继续掺入 RAP,混合料空隙率超出规范要求范围,当掺入 60% RAP 时,RAP—WMA 空隙率达到了 10.37%,几乎超过 WMA 空隙率的两倍,这是由于掺入 RAP 后沥青流动性降低,集料被沥青裹覆不充分,从而造成沥青混合料空隙率增大、密实度降低。

(2) 掺入 UMEO 再生剂可显著降低沥青混合料空隙率。图 4 中,同一 RAP 掺量下,沥青混合料空隙率随着 UMEO 掺量增加而迅速降低,表明 UMEO 再生剂可软化硬质老化沥青,增大沥青流动性,使颗粒间空隙在击实功作用下能够被充分嵌挤填充,从而降低沥青混合料空隙率;继续增加 UMEO 掺量至 15%,此时 RAP—WMA 空隙率为 2.788% 低于 DBM 空隙率下限,可见过高的 UMEO 再生剂掺量不利于混合料空隙率的发展。

相对空隙率计算结果见图 5、6。

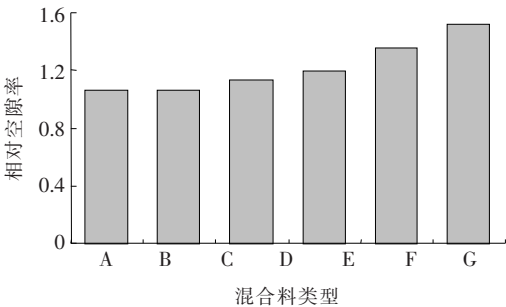


图 5 无再生剂试件相对空隙率

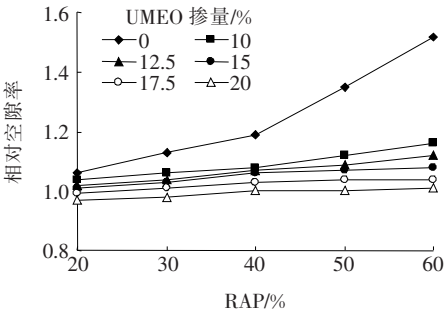


图 6 掺入 UMEO 再生剂试件相对空隙率

由图 5、6 可知:

(1) 提高 RAP 掺量会增大沥青混合料相对空隙率。图 5 中混合料相对空隙率皆大于 1,可见温拌沥青混合料空隙率普遍高于热拌沥青混合料,且随着 RAP 掺量增加,这种差距越来越显著;当 RAP 掺量增加至 30% 时,混合料相对空隙率为 1.13 大于规范上限 1.1;继续增加至 60%,其相对空隙率达到 1.52,此时 RAP—WMA 空隙率几乎为同种掺量 RAP—HMA 的 1.5 倍多,表明同种 RAP 掺量下,热拌技术成型试件密实度要高于温拌技术成型试件,且过高的 RAP 掺量会对沥青混合料压实特性产生较大影响。

(2) 掺入 UMEO 再生剂可显著改善沥青混合料相对空隙率。图 6 中,随着 UMEO 掺量增加,混合料相对空隙率值呈下降趋势,且 RAP 掺量越高这种趋

势越明显,由此可知掺入 UMEO 再生剂可以令 RAP—WMA 压实特性与同种掺量的 RAP—HMA 接近甚至更好。

2.2.3 高温性能

沥青混合料马歇尔模数与抗车辙性能间有较好相关性,可以用于评价其高温性能,马歇尔模数计算结果如图 7、8 所示。

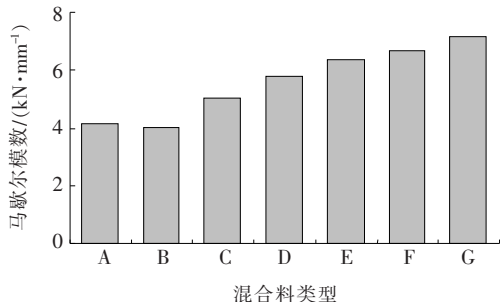


图 7 无再生剂试件马歇尔模数

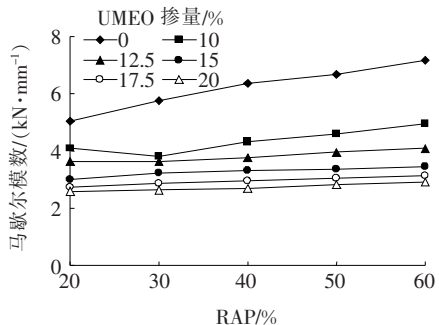


图 8 掺入 UMEO 再生剂试件马歇尔模数

由图 7、8 可知:

(1) 随着 RAP 掺量增加,沥青混合料马歇尔模数逐渐增大。图 7 中 WMA 马歇尔模数与 HMA 相当,说明二者抗车辙性能较为相近,掺入 RAP 后,沥青混合料马歇尔模数呈持续增大趋势,且当 RAP 掺量超过 20% 时,混合料马歇尔模数超过 5 kN/mm,不满足要求;继续掺加 RAP 至 60%,其马歇尔模数高达 7.18 kN/mm,这主要是由于 RAP 掺量增加后沥青混合料中硬质老化沥青比例增大,使得混合料高温下抗塑性变形能力增强,从而其流值快速降低、马歇尔模数增大,但老化沥青比例增大也会导致混合料承载力降低,于抗车辙性能不利。

(2) 沥青混合料马歇尔模数随着 UMEO 再生剂掺量增加呈现有利下降趋势。图 8 中,不掺入再生剂情况下,除 20% RAP—WMA 外,其余掺量 RAP—WMA 马歇尔模数皆不满足规范要求;掺入 10% UMEO 再生剂后,各掺量下 RAP—WMA 马歇尔模

量均降低至 5 kN/mm 以下,低于规范要求上限;继续掺入 UMEO 至 20%,各掺量下马歇尔模数稳定在 2 kN/mm 以上,高于规范要求下限;且 UMEO 掺量为 10% 时曲线各点要高于其他 UMEO 掺量曲线,说明 10% UMEO 掺量下 RAP—WMA 具有较好的抗车辙性能。

2.2.4 力学性能

单轴压缩试验操作简便,试验指标也较为直观,可用于评价沥青混合料力学性能,60 °C 单轴压缩试验结果见图 9、10。

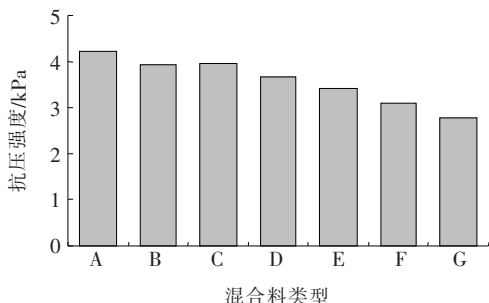


图 9 无再生剂试件 60 °C 抗压强度

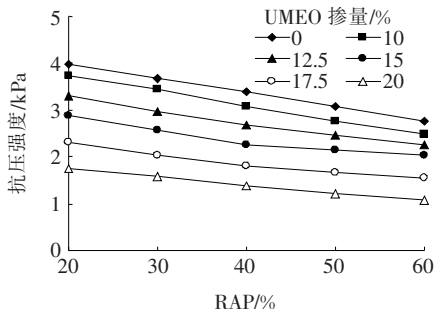


图 10 掺入 UMEO 再生剂试件 60 °C 抗压强度

由图 9、10 可知:

(1) 提高 RAP 掺量会显著降低沥青混合料抗压强度。图 9 中沥青混合料抗压强度随着 RAP 掺量的增加而降低,其中 20% RAP—WMA 抗压强度与 WMA 相同,可见掺入低 RAP 掺量对沥青混合料力学性能几乎无影响;继续掺入 RAP 至 30%,RAP—WMA 抗压强度较 WMA 下降了 0.26 kPa,而掺入 60% RAP 后,其抗压强度较 WMA 下降了 1.16 kPa,可见高 RAP 掺量对沥青混合料力学性能影响较大。

(2) 掺入 UMEO 再生剂后沥青混合料抗压强度有显著改善。图 10 中,掺入 UMEO 后沥青混合料抗压强度随着 RAP 掺量增大而降低的趋势有所缓解。不掺加再生剂时,当 RAP 掺量从 20% 提高至 60%,RAP—WMA 抗压强度由 3.97 kPa 降低至 2.78 kPa,

下降了 1.19 kPa;当掺入 20% UMEO, RAP 掺量从 20% 提高至 60% 时其抗压强度由 1.76 kPa 降低至 1.07 kPa, 仅降低了 0.69 kPa, 可见掺入 UMEO 再生剂可显著改善沥青混合料力学性能。

2.2.5 水稳定性

采用残留稳定性和冻融劈裂强度比 TSR 对不同 UMEO 再生剂掺量的 RAP-WMA 水稳定性进行评价, 残留稳定性计算结果见图 11、12。

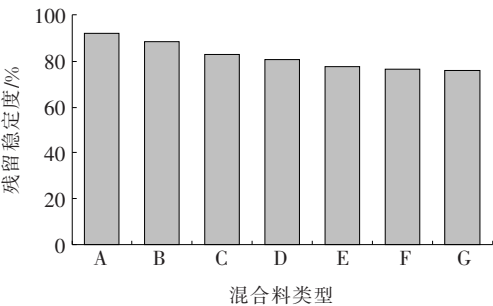


图 11 无再生剂试件残留稳定度

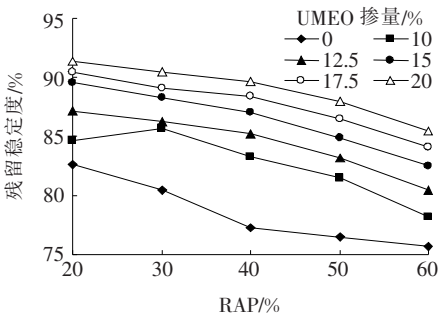


图 12 掺入 UMEO 再生剂试件残留稳定度

由图 11、12 可知：

(1) 提高 RAP 掺量会降低沥青混合料残留稳定度，一定掺量后其残留稳定度逐渐趋于稳定。图 11 中，WMA 残留稳定度略低于 HMA，可见 HMA 水稳定性要优于 WMA；掺入 30% RAP 后，RAP-WMA 残留稳定降低至 80.4%，较 WMA 降低了 8.1%，尚在规范要求范围内；继续增加 RAP 掺量至 40%，其残留稳定度降低至 77.3% 小于 80%，不满足规范要求；当 RAP 掺量提高至 50% 及以上时，其残留稳定度与 40% RAP 掺量时相比几乎无变化，可见提高 RAP 掺量不利于沥青混合料水稳定性，而掺入一定量后，其对混合料水稳定性的影响不再继续加深。

(2) 掺入 UMEO 再生剂可显著提高沥青混合料残留稳定度。图 12 中，同一 RAP 掺量下的沥青混合料残留稳定度随着 UMEO 掺量增加而增大，这是由于 UMEO 再生剂可显著恢复 RAP 中旧沥青黏结性

能，改善沥青与集料间黏附性，水分难以侵入沥青—集料界面，从而增强了沥青混合料水稳定性。

冻融劈裂试验结果如图 13、14 所示。

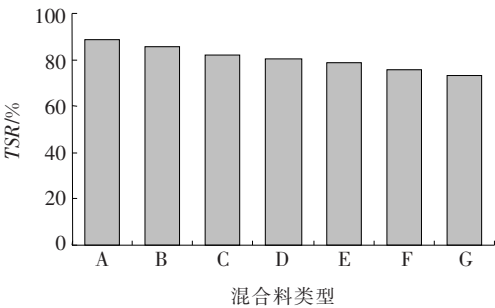


图 13 无再生剂试件 TSR

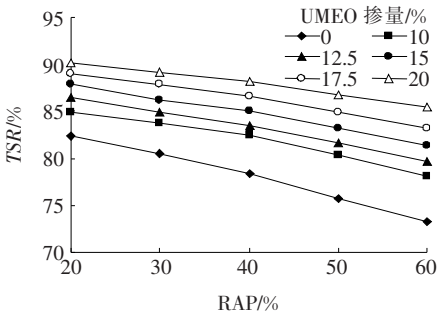


图 14 掺入 UMEO 再生剂试件 TSR

由图 13、14 可知：

(1) 提高 RAP 掺量会降低沥青混合料 TSR，且趋势较为平缓。图 13 中，当 RAP 掺量增加至 40% 时，RAP-WMA 的 TSR 为 78.32%，低于 80%，不满足要求；继续掺入 RAP，其 TSR 缓慢下降，且与规范要求值间差距被逐渐拉大，可见提高 RAP 掺量会缓慢减弱沥青混合料抵抗水损害能力。

(2) 掺入 UMEO 再生剂可显著提高沥青混合料 TSR，且随着 RAP 掺量的提高这种趋势越明显。可见 UMEO 再生剂可显著提高沥青混合料水稳定性，这与残留稳定度试验结果相验证。

3 显著性分析与再生剂掺量优选

3.1 显著性分析

采用显著性分析研究 UMEO 再生剂及 RAP 掺量两因素对 RAP-WMA 性能影响（主次排序），选取显著性水平 α 为 0.05，计算结果见表 5。

由表 5 可知：UMEO 掺量对抗压强度影响最显著，对相对空隙率影响显著性最小；RAP 掺量对 TSR 影响最显著，对相对空隙率影响显著性最小；各因素对

颗粒裹覆率、空隙率、相对空隙率、马歇尔模数、抗压强度、残留稳定度及 TSR 影响由大到小排序均相同,为:UMEO 掺量>RAP 掺量,且 UMEO 掺量对其影响显著;UMEO 掺量对 RAP—WMA 拌和均匀性、压

实特性、高温性能、水稳定性等性能皆影响显著。

3.2 再生剂掺量优选

根据上述室内性能试验结果,得出各性能指标、各 RAP 掺量下的最佳 UMEO 再生剂掺量范围,见表 6。

表 5 各因素对 RAP—WMA 性能影响分析

影响因素	拌和均匀性	压实特性		高温性能	力学性能	水稳定性		F 临界值
	(颗粒裹覆率)/%	空隙率/%	相对空隙率	(马歇尔模数)/(kN·mm ⁻¹)	(抗压强度)/kPa	残留稳定度/%	TSR/%	
UMEO 掺量	92.66	98.80	9.74	102.96	277.25	154.73	172.65	5.00
RAP 掺量	23.80	76.39	4.94	15.63	75.98	105.05	123.78	

表 6 优化组合

RAP 掺量/%	以下指标的 UMEO 掺量/%					
	颗粒裹覆率	空隙率	相对空隙率	马歇尔模数	残留稳定度	TSR
20	—	0~10	—	—	—	—
30	10~20	10~12.5	10~20	10~20	10~20	—
40	10~20	12.5~17.5	10~20	10~20	10~20	10~20
50	10~20	15~17.5	12.5~20	10~20	10~20	10~20
60	10~20	17.5~20	15~20	10~20	12.5~20	15~20

由表 6 可知:综合考虑沥青混合料各项性能指标,优选出各 RAP 掺量下的最佳 UMEO 再生剂掺量分别为:20%RAP—0~10%UMEO、30%RAP—10%~12.5%UMEO、40%RAP—12.5%~17.5%UMEO、50%RAP—15%~17.5%UMEO、60%RAP—17.5%~20%UMEO,且满足该优选掺量范围的 RAP—WMA 颗粒裹覆率、空隙率、相对空隙率、马歇尔模数、残留稳定度、TSR 等性能指标皆满足规范要求。

4 结论

- (1) 掺入 UMEO 再生剂可显著改善沥青混合料拌和均匀性、压实特性、高温性能、力学性能和水稳定性,且随着 RAP 掺量增加,其对部分性能的增益越显著。
- (2) 掺入再生剂可有效提高 RAP—WMA 的掺量,对比同类混合料性能,掺入 UMEO 可将 RAP 掺量从 20%提高至 60%。
- (3) 基于显著性分析结果可知,UMEO 掺量对各性能指标皆影响显著,且对抗压强度影响最显著,对相对空隙率影响显著性最小。
- (4) 综合考虑沥青混合料各项性能,优选出各 RAP 掺量下的最佳再生剂掺量范围:20%RAP—0~

10%UMEO、30%RAP—10%~12.5%UMEO、40%RAP—12.5%~17.5%UMEO、50%RAP—15%~17.5%UMEO、60%RAP—17.5%~20%UMEO,且满足该优选掺量范围的 RAP—WMA 各项性能皆能满足规范要求。

参考文献:

[1] Farooq M A, Mir M S, Sharma A. Laboratory Study on Use of RAP in WMA Pavements Using Rejuvenator[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 61—72.

[2] Kumar K K, Rajasekhar R, Reddy M A, et al. Reclaimed Asphalt Pavements in Bituminous Mixes[J]. Indian Highways, 2014, 42(4).

[3] Mohamady A, Elshahat A, Abd—Elmaksoud M F, et al. Effect of Using Reclaimed Asphalt Pavement On Asphalt Mix Performance[J]. Iosr Journal of Computer Engineering (Iosr—Jce), 2014, 16(6): 55—67.

[4] El—Maaty A E A, Elmohr A I. Characterization of Recycled Asphalt Pavement (Rap) for Use in Flexible Pavement[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2015, 8(2): 233—248.

[5] Buss A, Rashwan M, Williams R C. Investigation of Warm—Mix Asphalt Using Iowa Aggregates. [R]. Iowa State University. Institute for Transportation, 2011.

纳米 ZnO 对基于硫磺类稳定剂的 SBS 改性沥青性能影响研究

张文刚¹, 丁龙亭², 李忠梅^{1*}

(1. 山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 长安大学 公路学院)

摘要: 为了探明纳米 ZnO 对基于硫磺稳定剂的 SBS 改性沥青技术性能及沥青混合料的影响规律, 研究采用纳米 ZnO 为原材料, 借助硫化反应原理分析了纳米 ZnO 在 SBS 改性沥青制备过程中的作用机理, 并进行了掺加 ZnO 的 SBS 改性沥青技术性能及沥青混合料路用性能室内试验。研究表明: 纳米 ZnO 掺入后, SBS 改性沥青 48 h 离析软化点差显著降低, 135 ℃ 布氏黏度明显增大, 其他技术指标未见明显变化, 基于 SBS 改性沥青热存储稳定性的纳米 ZnO 合理掺量为 4% (硫磺质量百分比), 掺纳米 ZnO 的 SBS 改性沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等方面均略有提升, 并且拥有更小的析漏损失及飞散损失。

关键词: ZnO; SBS 改性沥青; 离析软化点差; 路用性能

1 前言

基于 SBS 改性沥青自身存在的缺陷, 近年来纳米材料与 SBS 复合改性的研究成为了一项研究热点。纳米 ZnO 一般作为活性剂被广泛应用于硫磺的硫化反应中。也有采用 ZnO 对沥青进行改性的报道。陈渊召等制备了纳米 ZnO 改性沥青, 提出了基质沥青与纳米 ZnO 粒子共熔体系理论; 肖鹏等对纳米 ZnO/SBS 复合改性机理进行了研究, 提出纳米 ZnO 与沥青

能够发生化学改性作用; 康爱红等对纳米 ZnO/SBS 复合改性机理进行了研究, 认为单独使用 ZnO 对 SBS 改性沥青热存储稳定性改善效果不显著, 配合稳定剂使用效果最佳。综合国内外研究现状, ZnO 对 SBS 改性沥青性能的影响研究还不够深入, 特别是 ZnO 改善 SBS 改性沥青技术性能机理不够明晰, 性能变化规律总结不够全面。该文在上述研究现状的基础上, 首先通过硫化反应原理对纳米 ZnO 提升 SBS 改性沥青性能机理展开探讨; 其次通过室内试验探究掺加 ZnO 的 SBS 改性沥青性能变化规律, 特别是高温贮存稳定性,

- [6] Farooq M A, Mir M S. Use of Reclaimed Asphalt Pavement (Rap) in Warm Mix Asphalt (Wma) Pavements: A Review [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2(1): 10.
- [7] Oner J, Sengoz B. Utilization of Recycled Asphalt Concrete with Warm Mix Asphalt and Cost-Benefit Analysis [J]. Plos One, 2015, 10(1).
- [8] Mallick R, Kandhal P, Bradbury R. Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008(2 051): 71-79.

- [9] Nahar S N, Qiu J, Schmets A, et al. Turning Back Time: Rheological and Microstructural Assessment of Rejuvenated Bitumen [J]. Transportation Research Record, 2014, 2444(1): 52-62.
- [10] 谢海群, 马忠庭, 韩云, 等. 废汽油机油再生工艺研究 [J]. 石油炼制与化工, 2017(1).
- [11] 肖庆一, 李正中, 朱俊慧. 废机油再生剂对高旧料含量再生沥青混合料性能的影响 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2018(11).
- [12] 刘洪海, 刘聂扬子, 郝玉飞, 等. 矿料粒径对拌和时间的影响与梯次拌和技术 [J]. 中国公路学报, 2017(10).

收稿日期: 2019-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 51408044); 山东省优秀中青年科学家奖励基金资助项目 (编号: BS2015SF016)

作者简介: 张文刚, 男, 博士, 讲师. E-mail: ziwuzizwg@sdut.edu.cn

* 通信作者: 李忠梅, 女, 硕士, 副教授. E-mail: 6675342@163.com